

Magnetische Curven

um

einen Rommershausen'schen
Elektromagnet.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doctorwürde

bei der

hohen philosophischen Facultät der Universität Marburg

eingereicht von

Gottfried Kümmell

aus Aue bei Eschwege.



Marburg 1887.

Magdalena Curran

einem Kommerzienrat zu sein

Stellvertreter

Industriemissionen

im

Reichsverband der Industriellen

in der

Industriellen Kommission des Reichstages

am 1. April 1901

Herrn Dr. Schmidt

in der

Industriellen Kommission

Vorliegende Arbeit wurde im Winter 1886/87 und Sommer 1887 auf dem mathematisch-physikalischen Institut zu Marburg angefertigt.

Herrn Professor Dr. Melde, der so gütig war, mir die Anregung dazu zu geben, und während der Dauer meiner Untersuchungen mich aufs freundlichste mit den nötigen Instrumenten versorgte, spreche ich an dieser Stelle meinen herzlichsten Dank aus.



Seinen

—*— lieben Eltern —*—

gewidmet

vom Verfasser.

Zeiten

Lieber Eltern

von

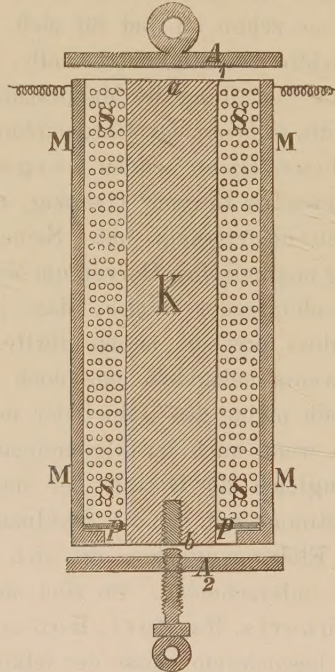
von

Der Untersuchung magnetischer Curven ist gewiss Bedeutung zuzuschreiben. Denn ist sie schon an und für sich nicht uninteressant, so hat sie eine ganz besondere Wichtigkeit deshalb, weil sie einen sicheren Aufschluss giebt über die Verteilung des Magnetismus in dem untersuchten Körper. Unter denen, die sich mit der Untersuchung magnetischer Curven beschäftigt haben, ist besonders zu nennen Herger, der in einem grossen Werke „Systeme magnetischer Curven“ (Leipzig, 1844) die Resultate umfangreicher Forschungen niedergelegt hat. Seine Arbeit behandelt das Gebiet der Untersuchung magnetischer Curven um Magnete von permanentem Magnetismus in so erschöpfender Weise, dass in dieser Richtung die Forschung ihren Abschluss erreicht haben dürfte. Doch ist ein Gebiet meines Wissens noch wenig behandelt, das doch gerade von besonderem Interesse sein müsste, ich meine das Gebiet der magnetischen Curven um Elektromagnete. Denn wenn auch im allgemeinen die Form der Elektromagnete und damit zugleich die Gestalt der magnetischen Curven um dieselben nahe übereinstimmt mit der der Stahlmagnete, so giebt es doch verschiedene Arten von Elektromagneten, die sich in beiden Beziehungen von den Stahlmagneten unterscheiden. So sind zu erwähnen die Elektromagnete von Joule, Roberts, Radfort, Rommershausen u. anderen. Alle diese, und in ganz besonderem Masse der letztere, zeichnen sich durch eine auffallend grosse Tragkraft aus, die sich erklärt aus der möglichst grossen Ausnutzung der magnetisierenden Kraft der vom elektrischen Strom durchflossenen Spirale. Die Systeme magnetischer Curven um einen Elektromagnet von Rommershausen zu untersuchen, war nun meine Aufgabe.

Zunächst wollen wir die Form dieses Elektromagneten näher betrachten. Ihn erfand Rommershausen 1851 in Marburg, später, 1857, kam dann Zöllner zwecks Herstellung einer möglichst vollkommenen elektromagnetischen Kraftmaschine, wie es scheint, selbständig zu derselben Construction. An die Beschreibung, wie sie Rommershausen im „Polytechnischen Journal“ von 1851, Bd. 120, Seite 358 giebt, will ich mich im folgenden halten.

Ein cylindrisches Stäbchen *K* von weichem Eisen (siehe beistehende Figur, die den Durchschnitt darstellt) ist unwickelt mit einer Spirale *S*

von umsponnenem Kupferdraht, die ihrerseits wiederum von dem gleichfalls aus weichem Eisen bestehenden Mantel M umgeben ist. Am Ende b ist dieser Mantel nach innen umgebogen, um einen festen Halt zu gewähren für ein Eisenplättchen P , welches an K befestigt ist. An beiden Enden a und b können Anker A_1 und A_2 angelegt werden, von denen

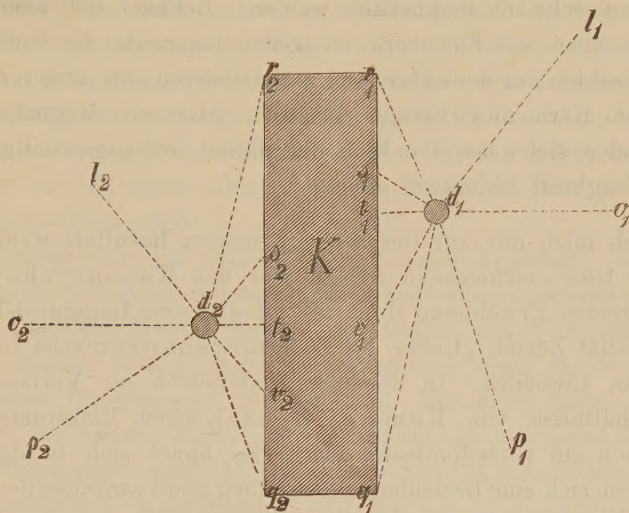


A_2 vermittelt einer in K hineingehenden Schraube in festen Zusammenhang mit dem Apparat gebracht werden kann. Die beiden bei a herausragenden Enden der Spirale können mit einer elektrischen Batterie verbunden werden und es ist klar, dass ein die Spirale durchfließender elektrischer Strom Kern und Mantel in entgegengesetzter Weise magnetisieren muss. Die Masse seines Elektromagneten giebt Rommershausen, wie folgt an:

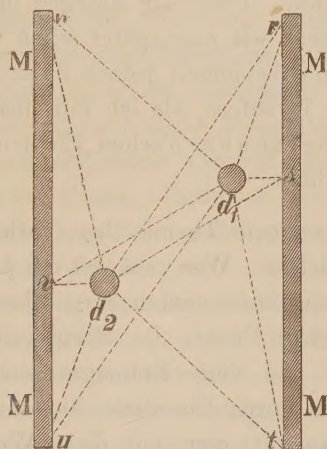
Der Kern hatte eine Länge von 84 mm., einen Durchmesser von 9 mm. und trug bei einem Gewicht von 10 Lot einschliesslich des befestigten Ankers und der Spirale ein Gewicht von 6 Lot, dagegen mit dem 2 mm. dicken Mantel armirt 384 Lot, während ein Bunsen'sches Zink-Kohlenelement den Strom lieferte. Ein Stäbchen vom Gewicht des ganzen Apparats trug nur 15 Lot. Diese grosse Steigerung der Tragkraft erklärt Dub

in seinem Werke „der Elektromagnetismus“ (Berlin. J. Springer) in folgender Weise:

Umgiebt man einen Kern von weichem Eisen K mit einem vom elektrischen Strome durchflossenen Draht, dessen Durchschnitte d_1 und d_2 seien, so leuchtet ein, dass nur die nach innen gerichteten magnetisierenden Strahlen, also z. B. $d_1 r_1, d_1 s_1, d_1 t_1, d_1 v_1, d_1 q_1$, u. $d_2 r_2, d_2 s_2, d_2 t_2, d_2 v_2$



$d_2 q_2$, ihre Wirkung auf den Kern äussern können, während die übrigen also z. B. $d_1 l_1, d_1 o_1, d_1 p_1$, u. $d_2 l_2, d_2 v_2, d_2 p_2$, nicht ausgenützt werden.



Ebenso erklärt sich die Thatsache, dass der Mantel für sich allein nur ganz schwach magnetisch wird. d_1 und d_2 seien wieder die Durch-

schnitte eines magnetisierenden Drahtes, der sich in dem aus weichem Eisen bestehenden Mantel M befindet. Auf die Punkte r , s und t wirken jetzt ausser den Strahlen $d_1 r$, $d_1 s$, $d_1 t$ von d_1 noch von d_2 die Strahlen $d_2 r$, $d_2 s$, $d_2 t$ und zwar mit den ersteren entgegengesetzter Wirkung. Dasselbe findet an jedem anderen Punkte statt. Indem so die verschiedenen Teile einer im Innern eines Eisenmantels befindlichen Spirale sich in ihrer Wirkung auf denselben gegenseitig abschwächen, kann derselbe nur verhältnismässig schwach magnetisch werden. Befindet sich aber im Innern der Spirale noch ein Eisenkern, so treffen einerseits die nach innen gerichteten Strahlen auf denselben und magnetisieren ihn, andererseits dienen die bei dem Kern unwirksamen Strahlen jetzt zur Magnetisierung des Mantels. Indem sich ausserdem Kern und Mantel noch gegenseitig verstärken, muss die Tragkraft bedeutend steigen.

Ehe ich mich nun zur Besprechung meiner Resultate wende, will ich noch einer 1886 erschienenen Arbeit über den Rommershausen'schen Elektromagneten Erwähnung thun. Es ist dies eine Inaugural-Dissertation der Universität Zürich „Ueber das Rommershausen'sche Inductorium“ von Nahum Livschitz. In derselben untersucht der Verfasser, welche Grössenverhältnisse von Rommershausen'schen Elektromagneten für die Induction am vorteilhaftesten sind. Es findet sich in derselben ein Punkt, in dem sich eine Beziehung zu erkennen giebt zwischen den Resultaten des Verfassers und den meinigen und zwar ist dies dort der Fall, wo er von dem Einfluss des Deckels, wie er den unbefestigten Anker nennt, spricht und die bedeutende Wirkung des Anlegens und Abreissens desselben auf die Induktion erwähnt. Denn das Anlegen und Abreissen des Ankers hat auch in meiner Arbeit, wie man später sehen wird, eine hervorragende Bedeutung. Im Übrigen behandelt jedoch diese Arbeit ein ganz anderes Gebiet als die meinige, in sofern, als ich mir lediglich die Magnetkraftlinien um den Rommershausen'schen Elektromagnet zu untersuchen zur Aufgabe gemacht habe.

Ich gehe jetzt zu meinem Thema über, vorher will ich jedoch noch einige Worte vorausschicken. Was zunächst die Art der erhaltenen Curven anbetrifft, so sind es die sogenannten Magnetkraftlinien, solche Curven, deren Tangente in jedem Punkte die Resultante aus den Kräften des magnetischen Körpers und dem Erdmagnetismus darstellt. Dieselben Curven erhält man auch durch Eisenfeile, die man um den betreffenden Magnet streut, doch kommt man auf diese Weise nicht zu genaueren Resultaten. Da jedoch auch eine Magnetnadel sich in jedem Punkte der Curven tangential zu denselben stellt, so besitzt man mit dieser ein be-

deutend feineres Instrument zur Construction der magnetischen Curven. Diesen Weg schlug ich ein.

Jedoch stiess ich auch hier auf eine Schwierigkeit. Die Grössenverhältnisse der Nadel können dabei nicht ohne Einfluss auf die Gestalt der Curven sein, wenn die Nadel nicht verschwindend klein ist gegenüber dem Magneten. So wäre es denn zu wünschen gewesen, dass ich mit möglichst kleinen Nadeln hätte arbeiten können, angestellte Versuche ergaben jedoch, dass man, wenn man sichere Einstellung wünscht, mit der Länge der Nadel nicht unter eine Grenze von etwa 12 mm. heruntergehen darf. Dies macht jedoch wiederum die Curven in unmittelbarer Nähe des Magneten etwas unsicher, eine Ungenauigkeit, von der ich leider meine Resultate nicht vollständig befreien konnte. Doch handelt es sich dabei immer nur um kleinere Abweichungen, durch die das Gesamtergebn wenig beeinträchtigt wird.

Ich komme nun zur Beschreibung meiner Apparate. Die Grössenverhältnisse des benutzten Rommershausen'schen Elektromagnets waren folgende: Kern und Mantel hatten eine Länge von 120 mm., der Kern einen Durchmesser von 19 mm., der Mantel bei einer Dicke von 3 mm. einen äusseren Durchmesser von 49 mm. Der Kern hatte ein Gewicht von 288 gr., der Mantel von 447 gr. Die Spirale bestand aus 4 übereinander liegenden Windungen eines $11\frac{3}{4}$ m. langen und $1\frac{1}{2}$ mm. dicken, mit Gutta-percha überzogenen Kupferdrahts. Erregt von 2 Bunsen'schen Zink-Kohlenelementen trug der Kern allein ein Gewicht von 3,3 kgr. bei einer Stromstärke von 5,3 Ampère, dagegen mit dem Mantel umgeben ein Gewicht von 30 kgr., also etwa das 10 fache. Die Nadel, aus starkem Stahlblech, war von rhombischer Gestalt und hatte eine Länge von 14 mm. Sie war beklebt mit zwei Papierstreifen als Dämpfern, damit sie schneller zur Ruhe kam und wurde aufgehängt an einem Coconfaden. Was die Elektrizitätsquelle anbetrifft, so hatte ich vor allem darauf zu sehen, dass die Stromstärke constant blieb zum mindesten während der Dauer eines Versuches, eine Constanz während der Dauer sämtlicher Versuche war jedoch sehr wünschenswert. Deshalb kam ich nach mannigfachem Probieren auf Daniell'sche Becher, in die ich statt der verdünnten Schwefelsäure Bittersalzlösung brachte. Wenn ich alle acht Tage für Erneuerung derselben sorgte und die Kupfervitriollösung durch tägliches Hineinwerfen von Stückchen Kupfervitriol concentrirt erhielt, so bekam ich einen Strom, der vollständig meinen Anforderungen genügte. Ich benutzte 3 auf diese Weise hergerichtete grossflächige Daniell'sche Becher, die ich neben einander geschaltet hatte und erhielt so einen elektrischen Strom, der während der ganzen Dauer meiner Versuche constant auf etwa 0,64 Ampère blieb.

Die Versuche selbst führte ich folgendermassen aus: Auf zwei Tischen wurde eine starke Pappe möglichst eben ausgespannt, so dass zwischen beiden noch ein schmaler Raum übrig blieb, wo die Pappe keine Unterlage hatte. Hier war in dieselbe ein Loch von der Grösse des Längsdurchschnitts des Elektromagneten geschnitten und der letztere wurde hier mittelst eines Gestells so befestigt, dass er sich zur Hälfte über und zur Hälfte unter der Pappe befand. Auf der Pappe war ein Bogen Papier befestigt und auf diesem wurden die Curven in folgender Weise gezeichnet: An einem beliebigen Punkte stellte ich die Nadel auf und wartete bis sie sich beruhigt hatte. Nachdem die Richtung, in der die Nadel zeigte, durch einen Strich mit dem Bleistift bezeichnet war, führte ich die Nadel in derselben ein wenig weiter und wartete wieder bis sie in Ruhe war. Diese jetzt etwas veränderte Richtung der Nadel bezeichnete ich ebenfalls und führte sie dann wieder in derselben weiter. Indem ich in dieser Weise fortfuhr, erhielt ich die verschiedenen Systeme von Curven. Aus mehreren solchen in jeder Lage des Magnets gezeichneten Blättern stellte ich dann die beiliegenden Tafeln zusammen, so dass ich wohl auf möglichste Genauigkeit rechnen darf. Bemerken will ich noch, dass eine Änderung der Stromstärke wohl eine Änderung der Ausdehnung der Curven hervorbrachte, auf die wesentliche Gestalt derselben jedoch ohne Einfluss blieb. Die Richtung des Stromes musste natürlich bei allen Versuchen dieselbe bleiben.

Ich komme jetzt zur Betrachtung der erhaltenen Curven selbst. Der Gang in dem ich meine Versuche anstellte, ist nicht derselbe, wie der, in dem ich die gewonnenen Resultate betrachten will, doch schien mir aus Gründen der Zweckmässigkeit diese Abweichung nötig.

Betrachten wir zuerst die durch die magnetisierende Spirale allein hervorgerufenen Curven, wie sie in Tafel I und II dargestellt sind.

Tafel I stellt die Magnetkraftlinien dar, wie sie sich ergeben, wenn die Spirale im Meridian in sogenannter „natürlicher“ Lage liegt, das heisst in der Lage, in die sie sich, sich selbst überlassen, einstellen würde. Dabei habe ich, wie in allen anderen Tafeln, zur besseren Orientierung das eine Ende des magnetischen Körpers mit *a*, das andere mit *b* bezeichnet. Wie aus der Zeichnung auf Seite 8 ohne weiteres klar wird, bezieht sich *a* auf das Ende, welches den Anker trägt, der unbefestigt ist, *b* auf das Ende an das der andere Anker mittelst einer Schraube fest angeschoben werden kann; also in der Lage, in der der Magnet zum Tragen benutzt wird, bezieht sich *a* auf das untere, *b* auf das obere Ende. — Es treten hier 3 Arten von Curven auf, die ich der einfacheren Betrachtung halber wie hier, so auch in allen anderen Tafeln folgendermassen unter-

scheiden will: Ich nenne Curven erster Art solche, die den magnetischen Körper gar nicht berühren, also die nicht unterbrochenen Meridianlinien, die durch den Einfluss desselben Abweichungen von ihrem geradlinigen Verlauf erlitten haben, zweiter Art solche, die von dem Magneten aus- und in die Meridianlinien übergehen, dritter Art solche, die von demselben aus- und wieder zu ihm zurückgehen. Ausserdem sind besonders die in sämtlichen Tafeln mit *I* bezeichneten Punkte hervorzuheben. Es sind dies die sogenannten Indifferenzpunkte, Punkte, in denen die magnetischen Kräfte des betreffenden Körpers und der Erdmagnetismus sich das Gleichgewicht halten. Bei der vorliegenden Zeichnung I finden sich derartige Indifferenzpunkte je zu einer Seite der Spirale und zwar in ziemlich geringem Abstand von derselben. Ebenfalls seitwärts von der Spirale treten die Curven erster Art auf. Sie erleiden in der Nähe der Indifferenzpunkte eine starke Ablenkung, die in einer nach aussen offenen Krümmung besteht. Mit der Entfernung von der Spirale wird diese Krümmung schwächer und schwächer und verliert sich schliesslich ganz. Die Curven dritter Art verlaufen ebenfalls seitwärts von der Spirale und zwar zwischen den Indifferenzpunkten und der Spirale. Ihre Scheitel liegen in der Verbindungslinie der beiden Indifferenzpunkte; die Krümmung ist offen nach der Spirale hin. Sie sind nur durch je eine auf beiden Seiten vertreten, weil in grösserer Nähe der Spirale zu untersuchen nicht möglich war. Die Curven zweiter Art treten sowohl an den Seiten der Spirale als an ihren Enden auf. Die Krümmung der an den Seiten der Spirale auftretenden findet wieder in der Nähe der Indifferenzpunkte statt, sie ist offen nach aussen hin. Nach den Polen zu wird diese Krümmung schwächer und schliesslich zeigt die in der Mitte der Pole herauskommende einen völlig geradlinigen Verlauf, fällt also mit dem betreffenden Meridian zusammen. Ausserdem zeigen die Curven zweiter Art noch nach ihrer Krümmung ein ziemlich starkes Zusammendrängen.

Drehen wir jetzt die Spirale um 180° herum, so ändert sich die Sache vollständig. Die Spirale liegt jetzt „verkehrt“ im Meridian.

Jetzt hat sich die Lage der Indifferenzpunkte um 90° verändert, sie liegen vor den Enden der Spirale, zugleich ist ihre Entfernung vom Mittelpunkt derselben eine grössere geworden. Dies zeigt Tafel II. Im Unterschiede von Tafel I sehen wir jetzt nur 2 Arten von Curven, solche erster und solche dritter Art, die Curven zweiter Art sind verschwunden. Die Curven erster Art treten wieder zu beiden Seiten der Spirale auf und verlaufen mit ziemlich mässiger, nach der Spirale zu offener Krümmung; bei den Indifferenzpunkten erleiden sie jedoch jedesmal eine scharfe Umbiegung mit einer nach aussen hin offenen Krümmung, so dass sie

jetzt eine dreifache Krümmung aufweisen. Die Curven dritter Art verlaufen zwischen den ersteren und der Spirale, bei den an den Enden der Spirale entspringenden zeigt sich wieder die stärkste Krümmung, nach der Spirale hin offen, in der Nähe der beiden Indifferenzpunkte. Beide Arten von Curven rücken seitlich von der Spirale dicht aufeinander.

Tafel III und IV zeigen die von dem magnetisierten Kern allein hervorgerufenen Curven. Sie haben offenbar eine grosse Ähnlichkeit mit den schon betrachteten.

Tafel III stellt die Magnetkraftlinien dar, wie sie entstehen bei „natürlicher“ Lage des Kerns, *a* nach Süden und *b* nach Norden, entsprechend Tafel I. Der Kern wirkt gerade so wie die Spirale, wie sich ja auch erwarten liess, doch das Wirkungsgebiet desselben ist bedeutend grösser geworden. Dies zeigt sich hauptsächlich in dem weiteren Hinausrücken der Indifferenzpunkte, deren Entfernung vom Mittelpunkt des Magnets offenbar in einem gewissen Verhältnis steht zur magnetischen Intensität. Wie in Tafel I treten hier sämtliche 3 Arten von Curven auf, auch ist die Art und Weise ihres Auftretens, abgesehen von ihrer grösseren Ausdehnung, ziemlich dieselbe geblieben. Ausserdem hat sich jedoch das Bereich der Curven dritter Art etwas nach den Polen zu ausgedehnt.

Tafel IV stellt dann das Curvensystem des Kerns bei „verkehrter“ Lage, *a* nach Norden und *b* nach Süden, dar. Auch hier zeigt sich die Vergrösserung der Intensität in der Vergrösserung des Gebietes der Curven und der Entfernung der Indifferenzpunkte vom Mittelpunkte des Magneten. Wie in Tafel II liegen jetzt die Indifferenzpunkte wieder vor den Polen. Dem entsprechend haben wir wieder nur zwei Arten von Curven, erster und dritter Art. Die ersteren zeigen wieder die dreifache Krümmung, bestehend aus der einen Krümmung, die nach dem Magneten zu offen ist, und aus den beiden bei den Indifferenzpunkten, die nach ausen offen sind. Die Curven dritter Art zeigen ebenfalls dieselben Verhältnisse wie in Tafel II. Auch das Zusammendrängen der Curven erster und dritter Art seitwärts vom Magneten ist deutlich zu sehen.

Tafel V und VI stellen die Curven dar, wie sie der magnetisierte Mantel allein bewirkt.

In Tafel V liegt der Magnet mit *a* nach Süden und mit *b* nach Norden, entsprechend Tafel I und III. Aber jetzt zeigen die hier erhaltenen Curven Ähnlichkeit mit denen auf Tafel II und IV, das heisst in der Lage *a* nach Süden und *b* nach Norden liegt der Mantel „verkehrte“ im Meridian. Dies musste selbstverständlich der Fall sein, denn die Spirale magnetisiert ja einen ausserhalb gelegenen Körper entgegengesetzt zu einem innerhalb gelegenen. Doch bei der Vergleichung sieht man sofort,

dass die Ausbreitung der Curven eine viel geringere ist als in IV, aber immer noch bedeutend grösser als in II. So liegen auch die Indifferenzpunkte näher als in IV und weiter als in II. Die Curven sind ebenfalls wieder ziemlich dieselben wie in II und IV, Curven erster und dritter Art mit allen dort besprochenen Eigentümlichkeiten. Ausserdem sehen wir jedoch etwas vorher nicht Beobachtetes: An den Polen verlaufen die Curven dritter Art nicht nach ihrer Krümmung in der Nähe der Indifferenzpunkte direct auf den Magneten zu, sondern sie krümmen sich nach dem Mantel hin, eine Thatsache, die darauf hindeutet, dass sich im Innern der Spirale noch ein Indifferenzpunkt befindet. Leider war es mir nicht möglich mit meinen Hilfsmitteln im Innern der Spirale Untersuchungen anzustellen. Der Pol *b* zeigt eine kleine Verschiedenheit von *a*, eine Verschiedenheit, die sich jedoch leicht aus der etwas unregelmässigen Gestalt des Mantels bei *b* erklären lässt.

Drehen wir jetzt den Magnet um 180° herum, so dass jetzt *a* nach Norden und *b* nach Süden zu liegen kommt, so zeigen die jetzt erhaltenen Curven, wie sie Tafel VI darstellt wieder die grösste Übereinstimmung mit den Curven in Tafel I und III. Es liegt eben jetzt der Mantel in „natürlicher“ Lage im Meridian, und demgemäss treten die Indifferenzpunkte wieder zu beiden Seiten des Magneten auf. Die Curven sind wieder von allen drei Arten, sie zeigen dieselben Eigenschaften wie die besprochenen in Tafel I und III, nur hat sich ihr Ausbreitungsgebiet vergrössert bzw. verkleinert. Jedoch ist auch hier wieder ein Unterschied vorhanden: die Curven zweiter Art an den Polen zeigen eine doppelte Krümmung, eine ähnliche Krümmung wie in der vorigen Tafel, die wieder die Vermutung nahe legt, dass sich im Innern der Spirale noch ein Indifferenzpunkt befindet. Ausserdem zeigt in ähnlicher Weise der Pol *b* eine kleine Unregelmässigkeit, die sich auf dieselbe Weise, wie dort erklären lässt.

Fassen wir die bisher erhaltenen Resultate zusammen, so sehen wir, wenn wir aus der Lage der Indifferenzpunkte und der Ausbreitung der Curven einen Schluss ziehen wollen: Der Einfluss der Spirale allein auf die Curven tritt weit zurück hinter dem Einfluss sowohl des Kernes als des Mantels. Der Mantel wirkt dem Kern entgegengesetzt, abgesehen von der doppelten Krümmung der Curven an den Polen, nur wirkt er bedeutend schwächer. Wie sich nun die Sache gestalten wird, wenn Kern und Mantel zusammen wirken, darüber geben die folgenden Tafeln Aufschluss.

Um die Veränderungen zu zeigen, welche die Curven bei der Drehung des Magnets erleiden, habe ich eine solche um 360° ausgeführt und dabei

in jeder Stellung von 45° zu 45° die entstehenden Curven aufgezeichnet. Sie sind in den Tafeln VII—XIV dargestellt.

In Tafel VII zunächst liegt der Magnet in derselben Lage wie in I, III und V, also a nach Süden und b nach Norden. Der Kern liegt hier ebenso wie die Spirale in „natürlicher“, der Mantel in „verkehrter“ Lage im Meridian. Die hier erhaltenen Curven zeigen viel Übereinstimmung mit denen in I, III und VI. Wie dort treten die Indifferenzpunkte zu beiden Seiten des Magneten auf und zwar näher am Magneten wie in III und weiter davon entfernt als in VI. Was die Curven anbetrifft, so finden sich alle drei Arten an denselben Stellen und mit denselben Eigentümlichkeiten vor. Hierbei findet vollständige Symmetrie statt, sowohl nach dem Meridian als auch nach der Verbindungslinie der beiden Indifferenzpunkte, der Ost-West-Richtung. Unterschiede von Tafel III ergeben die Curven zweiter Art in der Nähe der Pole, indem hier dieselbe doppelte Krümmung sich zeigt, die wir schon in V beobachtet haben. Ihre Ursache ist also offenbar in dem Einfluss des Mantels zu suchen.

Drehen wir jetzt den Magnet um 45° aus dem Meridian, so erhalten wir die in Tafel VIII aufgezeichneten Curven. Die Indifferenzpunkte sind der Drehung gefolgt, wie aber ihre Verschiebung nach den Polen hin zeigt, war ihre Bewegung langsamer als die des Magneten. Ihre Verbindungslinie geht jetzt von ONO nach WSW. Zugleich haben sie sich etwas weiter vom Mittelpunkt des Magneten entfernt. Die auftretenden Curven sind erster, zweiter und dritter Art. Die Curven erster Art treten wieder seitwärts vom Magneten in Ost und West auf, sie zeigen die starke, nach aussen hin offene Krümmung wie früher in der Nähe der Indifferenzpunkte. Dabei ist auch ein Zusammendrängen zu bemerken, das aber jetzt einseitig von den Indifferenzpunkten in dem den Polen zunächst gelegenen Teil der Curven auftritt. Die Curven zweiter Art treten wieder hauptsächlich an den Polen auf, doch hat sich das Gebiet auf dem sie entspringen etwas verschoben nach den Seiten hin und zwar in derselben Weise, in der sich die Indifferenzpunkte um den Magnet verschoben haben. Die doppelte Krümmung kann jetzt nur auf einer Seite auftreten, da auf der andern schon so wie so eine derartige Krümmung vorhanden war, die der Einfluss des Mantels höchstens verstärken konnte. Die Curven dritter Art haben sich in gleicher Weise wie die zweiter in ihren Ausgangspunkten um den Magnet verschoben. Zugleich hat aber auch ihre Gestalt sich der allgemeinen Verschiebung angeschlossen, sie sind verzerrt nach dem einen Pol hin. Eine Symmetrie findet jetzt nach keiner Richtung mehr statt, wohl aber sind sich die gegenüberliegenden Quadranten gleich.

Drehen wir den Magneten um weitere 45° in derselben Richtung, so dass er jetzt senkrecht zum Meridian liegt, so stellt Tafel IX die in dieser Lage entstehenden Curven dar. Die Indifferenzpunkte haben sich in derselben Weise wie vorher weiter bewegt und ihre Verbindungslinie geht jetzt von SW nach NO. Dabei ist zugleich ihre Entfernung vom Mittelpunkt des Magneten wiederum etwas grösser geworden. Was die Curven anbetrifft, die wieder von erster, zweiter und dritter Art sind, so zeigt sich, dass die vorher erwähnte Verschiebung ihren Fortgang genommen hat. Und zwar ist sowohl das Zusammendrängen der Curven erster Art in dem einen Teil derselben noch stärker geworden und es haben sich die Ausgangspunkte der Curven zweiter und dritter Art in derselben Weise um den Magnet bewegt wie vorher, als auch ganz besonders die Verzerrung der Gestalt der letzteren noch bedeutender geworden ist. Im übrigen gilt auch hier das vorher Gesagte. Zu erwähnen dürfte jedoch vielleicht noch sein, dass die Curven zweiter und dritter Art, da wo sie bei einander entspringen, sich ebenfalls eng zusammendrängen.

Eine weitere Drehung um 45° ergibt die in Tafel X dargestellten Curven. Die Bewegung der Indifferenzpunkte ist in derselben Weise wie vorher fortgeschritten; dabei hat ihre Entfernung vom Mittelpunkt des Magneten wieder um ein beträchtliches zugenommen. Wie früher treten auch hier alle drei Arten von Curven auf und dabei zeigen sich die vorher besprochenen Verschiebungen wieder, jedoch sind sie allenthalben bedeutend grösser geworden. Auch die Krümmung der Curven ist überall stärker geworden, zugleich zeigt sich das Zusammendrängen der Curven in noch stärkerem Masse wie vorher. Eine Symmetrie findet ebenfalls nach keiner Richtung statt, wohl aber sind wieder die gegenüberliegenden Quadranten gleich.

Setzen wir die Drehung um 45° in derselben Weise fort, so kommen wir zu den in Tafel XI vorliegenden Resultaten. Jetzt liegt der Magnet in derselben Lage *a* nach Norden und *b* in Süden, wie in Tafel II, IV und VI, also der Kern „verkehrt“ und der Mantel „natürlich“ im Meridian. Die hier erhaltenen Curven zeigen deshalb grosse Übereinstimmung mit denen in Tafel IV und V. Wie dort liegen jetzt die Indifferenzpunkte im Süden und Norden vor den Polen des Magnets, jedoch weiter entfernt wie in V und näher wie in IV. Wie zugleich eine Vergleichung mit Tafel X ergibt, haben sich die Indifferenzpunkte in gleicher Weise wie dort weiter bewegt, und zugleich ist ihre Entfernung vom Magneten wieder gewachsen. Die Curven sind wie in IV und V nur von zwei Arten, der ersten und dritten, und zeigen dieselben Eigenschaften wie

dort. Ebenso wie dort findet auch hier wieder Symmetrie statt nach der Meridian-Richtung und der darauf senkrecht stehenden.

Bei einer weiteren Drehung um 45° wiederholen sich die Verhältnisse von Tafel X. In Tafel XII liegt ein genaues Spiegelbild vor von Tafel X, es ist einfach rechts mit links vertauscht. Deshalb gilt auch das bei Tafel X Gesagte jetzt entsprechend für Tafel XII.

In demselben Verhältnis, in dem Tafel XII zu X steht, steht Tafel XIII zu Tafel IX; auch hier gilt also das dort Gesagte in entsprechender Weise.

Ebenso ist Tafel XIV das Spiegelbild zu VIII, ich kann also auch hier auf die dort gemachte Beschreibung verweisen.

So geben also Tafel VII—XIV ein Bild der Veränderung der Curven und Bewegung der Indifferenzpunkte bei einer Drehung des Magneten um 360° . Offenbar ist die Bewegung der Indifferenzpunkte das leitende Princip für die Veränderung der Curven. Bei der Bewegung der ersteren zeigt sich nun das merkwürdige Resultat, dass dieselben bei einer Drehung des Magneten um 360° sich nur um 180° fortbewegen und also ihre gegenseitigen Plätze vertauschen. Dies macht anschaulich Tafel XV; hier sind die Stellungen der Indifferenzpunkte so aufgezeichnet, dass $I_{1,1}$ und $I_{2,1}$ die betreffenden Plätze der Indifferenzpunkte auf Tafel VII, $I_{1,2}$ und $I_{2,2}$ auf Tafel VIII, $I_{1,3}$ und $I_{2,3}$ auf Tafel IX u. s. w. darstellen. Verbindet man die verschiedenen Stellungen der Indifferenzpunkte durch eine geschlossene Curve, so zeigt sich: Die Bewegung der Indifferenzpunkte findet statt auf einer Ellipse, in der die Entfernung derselben vom Mittelpunkte des Magneten bei „natürlicher“ Lage desselben die halbe kleine und bei „verkehrter“ die halbe grosse Axe darstellt. Die Brennpunkte B_1 und B_2 dieser Ellipse liegen etwa doppelt so weit als die Pole des Magneten vom Mittelpunkte desselben entfernt. Auch lässt sich erkennen, dass die Geschwindigkeit der Bewegung der Indifferenzpunkte in der Nähe der Scheitel dieser Ellipse ein Maximum erreicht.

Ganz ähnliche Resultate wie die bisher besprochenen giebt aber auch ein einfacher Stahlmagnet bei der Drehung um 360° ; es geht also aus dem Gesagten hervor, dass bei blosser Induction durch den elektrischen Strom der Einfluss des Mantels auf die Gestaltung der Magnetkraftlinien, abgesehen von der teilweise auftretenden doppelten Krümmung derselben an den Polen, nur in einer Schwächung des Einflusses des Kerns besteht, die sich in einer Verminderung des Wirkungsgebietes desselben zu erkennen giebt.

Wie man jedoch noch zu ganz anderen Resultaten kommen kann, will ich im folgenden zeigen.

Bei einigen meiner Versuche hatte ich Curven von ganz abweichender Gestalt erhalten. Derartige Erscheinungen glaubte ich anfangs auf remanenten Magnetismus zurückführen zu können, nach einigen in diesem Sinne angestellten Untersuchungen erkannte ich jedoch, dass diese Erklärung unzureichend sei. So war ich einige Zeit im Zweifel, bis ich einsah, dass diese Erscheinungen ihren Grund hatten in einem zufällig vorgefallenen Anlegen der Anker an den Magneten und sich in folgender Weise erklären liessen: Durch das Anlegen der Anker an den Magneten, während er vom elektrischen Strom induciert war, wurde eine magnetische Verbindung hergestellt zwischen Mantel und Kern, infolge deren der letztere den ersteren ganz ausserordentlich stark magnetisch influenzierte und zwar ihm selbst natürlich entgegengesetzt. Bei vorsichtigem Abziehen der Anker blieb dieser starke Magnetismus zurück, wenn der Strom nicht unterbrochen wurde, und brachte jetzt eine ausserordentliche Veränderung der magnetischen Curven hervor.

Ja sogar nach Unterbrechung und Schliessung des Stromes blieben diese Veränderungen teilweise sichtbar und nach wiederholtem Unterbrechen und Schliessen zeigten sich noch Spuren davon, die erst bei einer Umkehr des Stromes vollständig verschwanden. Diese durch die starke magnetische Influenz des Mantels durch den Kern hervorgebrachten Curvensysteme will ich nun im folgenden betrachten. Auch hier habe ich eine Drehung des Magneten um 360° ausgeführt, doch genügte es die Curven von 90° zu 90° zu betrachten.

So stellt Tafel XVI die jetzt erhaltenen Curven dar, in derselben Stellung des Magneten wie in Tafel VII, *a* nach Süden und *b* nach Norden. Hier zeigt sich gleich auf den ersten Blick das merkwürdige Resultat, dass statt zweier Indifferenzpunkte hier deren vier auftreten. Sie haben auch jetzt eine andere Beziehung zu den magnetischen Kräften. Denn während bei den Tafeln I—XIV sich ein, allerdings in VII—XIV teilweise abgeschwächter, gleichartiger Magnetismus mit dem Erdmagnetismus in den Indifferenzpunkten das Gleichgewicht hielt, kommt hier als drittes Moment der starke, dem ersteren ungleichartige Magnetismus des Mantels hinzu, so dass also hier die Indifferenzpunkte Gleichgewichtspunkte sind zwischen drei Magnetismen, dem Erdmagnetismus, dem Magnetismus des Kerns und dem des Mantels. Daher hat sich auch die Lage der Indifferenzpunkte bedeutend verändert. Die in Tafel VII zu beiden Seiten des Magneten auftretenden Indifferenzpunkte haben sich in je zwei andere getrennt, die in die Nähe der Pole gerückt sind. Dementsprechend ist auch eine grosse Veränderung in der Gestalt der Curven vorgegangen. Auch hier sind alle drei Arten von Curven vorhanden. Die Curven erster

Art treten wieder zu beiden Seiten des Magneten auf, sie zeigen auch jetzt eine dreifache Krümmung, je eine nach aussen offene in der Nähe der Indifferenzpunkte und zwischen beiden eine dritte offen nach dem Magneten hin. Die Curven zweiter Art treten wieder hauptsächlich an den Polen auf, wo sie die charakteristische Doppelkrümmung zeigen, deren Wesen überhaupt hierdurch erst recht anschaulich gemacht wird. Ausserdem finden sich aber noch die Curven zweiter Art zu beiden Seiten des Magneten, sie entspringen hier am Ende *a* und verlaufen seitwärts vom Magneten, bis sie nach einer zweiten Krümmung in der Nähe der Indifferenzpunkte I_3 und I_4 allmählich in die geradlinig verlaufenden Meridiane übergehen. Ihr Erscheinen erklärt sich aus der unsymmetrischen Gestalt des Mantels, die jetzt einen grossen Einfluss hat und deren Folge ist, dass keine Symmetrienach der Ost-West-Richtung mehr stattfindet, wie dieselbe auch zugleich die Ursache der geringen Ausbreitung der Curven am Pole *b* ist, die sich zugleich verbindet mit der grösseren Annäherung der Indifferenzpunkte I_3 und I_4 gegenüber denen I_1 und I_2 . Die Curven dritter Art zeigen sich jetzt an verschiedenen Orten, einmal an den vier Ecken des Magneten und sodann auch an den Seiten desselben. An den Ecken des Magneten fallen sie auf durch ihre eiförmige Gestalt, an den Seiten haben sie einen ähnlichen Verlauf wie früher, zeigen aber noch eine starke Krümmung in der Nähe der Indifferenzpunkte I_3 und I_4 . Ein Zusammendrängen der Curven ist auch hier zu bemerken, es findet sich wiederum bei den Ausgangspunkten der Curven zweiter und dritter Art in ähnlicher Weise wie früher.

Eine Drehung um 90° verändert die Curven in der auf Tafel XVII dargestellten Weise. Hierbei haben sich die Indifferenzpunkte verschieden verhalten. I_1 und I_4 sind nur wenig hinter der Bewegung des Magneten zurückgeblieben, sie liegen noch immer ziemlich an denselben Plätzen in Bezug auf den Magneten wie in Tafel XVI, nur haben sie sich ein wenig nach der Mitte der Pole hin verschoben und sich dabei zugleich weiter vom Mittelpunkt des Magneten entfernt. I_2 und I_3 dagegen haben sich da ihre Bewegung etwas langsamer war, mehr verschoben in demselben Sinne wie I_1 und I_4 , zugleich haben sie sich jedoch dem Mittelpunkte genähert. Es treten hier wieder alle drei Arten von Curven auf; die erster Art vor den Polen seitwärts von den Indifferenzpunkten I_1 und I_4 mit einer starken, nach aussen offenen, Krümmung in der Nähe dieser und einer zweiten schwächeren in der Nähe der anderen Indifferenzpunkte. Die Curven zweiter Art treten ausser an den Polen, — durch diese Zeichnung wird jetzt noch klarer, weshalb sie in den früheren Tafeln dort nur einseitig doppelte Krümmung zeigen konnten, — auch wieder an den Seiten

des Magneten auf, jedoch jetzt gegenüber den Indifferenzpunkten I_2 und I_3 , im Unterschied von ihrem Auftreten in Tafel XVI. Die Curven dritter Art finden sich teils wieder an den Ecken des Magneten, teils an den Seiten vor, ihre Gestalt ist da, wo sie zwischen den Indifferenzpunkten I_2 und I_3 und dem Magneten auftreten, etwas nach den Indifferenzpunkten hin verzogen. Ihre Krümmung öffnet sich auch hier überall nach dem Magneten hin. In dieser Stellung des Magneten findet keine Symmetrie statt, auch sind die gegenüberliegenden Quadranten einander nicht gleich, sondern bloss ähnlich.

In Tafel XVIII liegt jetzt der Magnet wieder in derselben Lage wie in Tafel XI. Ihr entspricht auch die Lage der Indifferenzpunkte I_1 und I_4 , die jetzt völlig vor die Mitte der Pole gerückt sind und im Norden bzw. Süden sich befinden. Dagegen liegen jetzt die Indifferenzpunkte I_2 und I_3 , die in gleichem Sinne ihre Stellung zum Magneten verändert haben, im Osten und Westen, ganz wie in Tafel VII. Demgemäss zeigen auch die in ihrer Nähe befindlichen Curven eine ähnliche Übereinstimmung mit den auf diesen beiden Tafeln. Der Einfluss des Kerns tritt besonders deutlich an den Polen hervor, er ist die Ursache, dass hier die Indifferenzpunkte I_1 und I_4 liegen, da die Stellung desselben zum Meridian ja jetzt die „verkehrte“ ist. Dass die Indifferenzpunkte jetzt näher an den Polen liegen als in Tafel XI, ist Folge des teilweise abschwächend wirkenden Einflusses des Mantels, dessen Unregelmässigkeit ja auch bedingt, dass I_4 näher liegt als I_1 . Der Mantel selbst liegt jetzt „natürlich“ im Meridian, sein Werk sind daher die Indifferenzpunkte I_2 und I_3 , die jetzt infolge des schwächenden Einflusses des Kerns näher am Magneten liegen als in VII. Dass diese Indifferenzpunkte etwas nach b zu gerückt sind, ist auch wieder eine Folge der Unsymmetrie des Mantels. Die Curven erster Art finden sich in ähnlicher Weise wie in Tafel VII an den Seiten des Magneten, sie zeigen ihre stärkste Krümmung in der Nähe der Indifferenzpunkte I_2 und I_3 . Die Curven zweiter Art entspringen an den Ecken des Magneten, sie kommen auf ihrem Verlauf in die Nähe zweier Indifferenzpunkte und zeigen dort eine mehr oder minder starke Krümmung. Die Curven dritter Art treten wieder sowohl an den Polen als an den Seiten des Magneten auf, an den Polen in ähnlicher Weise wie in Tafel XI, an den Seiten wie in Tafel VII. Symmetrie findet jetzt wieder nach der Axenrichtung des Magneten statt.

Betrachten wir noch Tafel XIX, wo der Magnet in umgekehrter Lage wie in XVII sich befindet, so erkennen wir, dass wir hier das Spiegelbild von Tafel XVII vor uns haben. Das dort Gesagte hat also auch hier entsprechend seine Gültigkeit.

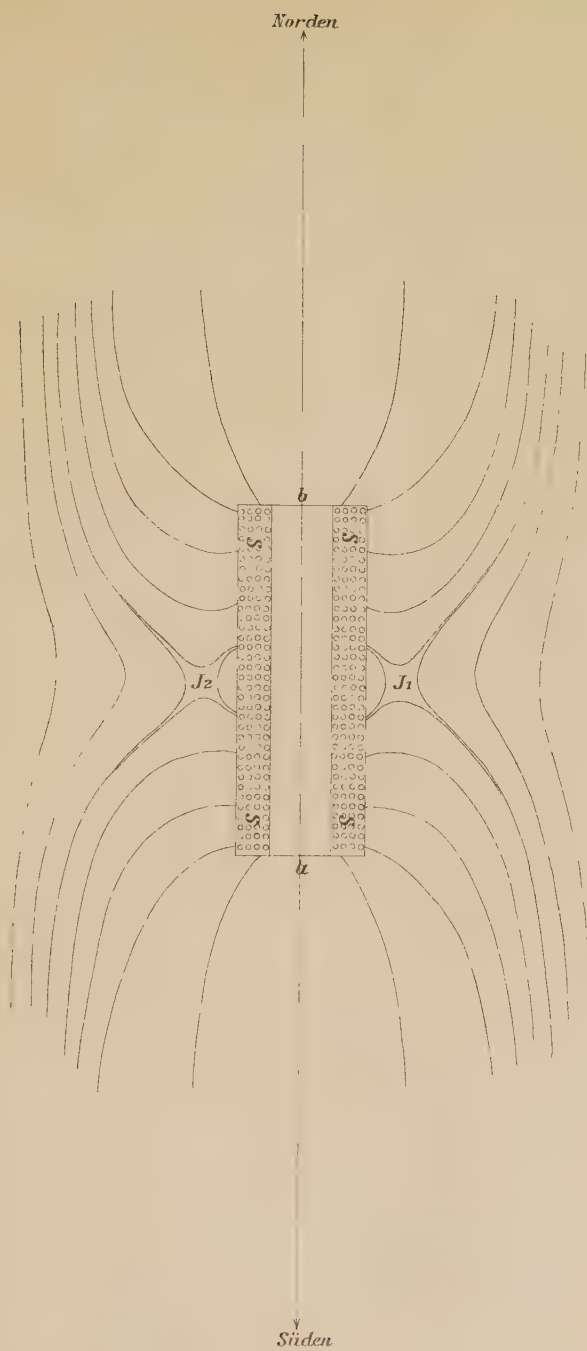
Die Bewegung der Indifferenzpunkte in den letzten 4 Tafeln veranschaulicht XX; die Bezeichnungen der Lagen der Indifferenzpunkte entsprechen den in Tafel XV gewählten. Wir erhalten hier keine regelmässige Ellipse, sondern eine dreifach verschlungene Linie, wiederum veranlasst durch die unsymmetrische Gestalt des Magneten, deren Einfluss sich in den letzten Zeichnungen überall zu erkennen giebt. Bei regelmässiger Gestalt des Magneten würde sich diese Curve sicher bedeutend vereinfachen, wahrscheinlich sogar ebenfalls zur Ellipse werden. Eine Merkwürdigkeit jedoch, die sich bei Betrachtung der Bewegungslinie der Indifferenzpunkte zeigt und deren Ursache nicht in der Unsymmetrie des Magneten zu suchen ist, ist die: Bei einer Drehung des Magneten um 360° rückt I_1 an den Platz von I_2 , I_2 an den Platz von I_4 , I_4 an den von I_3 und I_3 an den von I_1 . Also erst bei einer Drehung um 4 mal 360° würden die Indifferenzpunkte ihre alten Plätze wieder einnehmen.

Fassen wir jetzt nochmals die einzelnen Resultate zusammen, so ergibt sich: Der vorliegende Rommershausen'sche Elektromagnet verhält sich in Bezug auf das Gebiet der Magnetkraftlinien, abgesehen von kleinen Abweichungen, ähnlich wie ein einfacher Magnet, nach Anlegen der Anker erleiden die magnetischen Curven jedoch bedeutende Veränderungen, deren Ursache zu suchen ist in einer directen magnetischen Influenz vom Kern auf den Mantel.

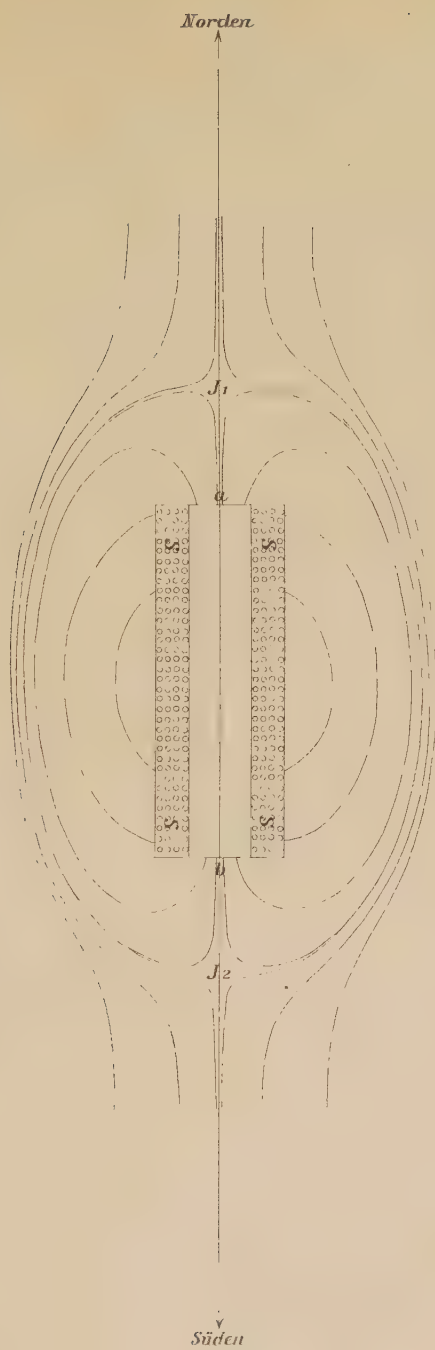




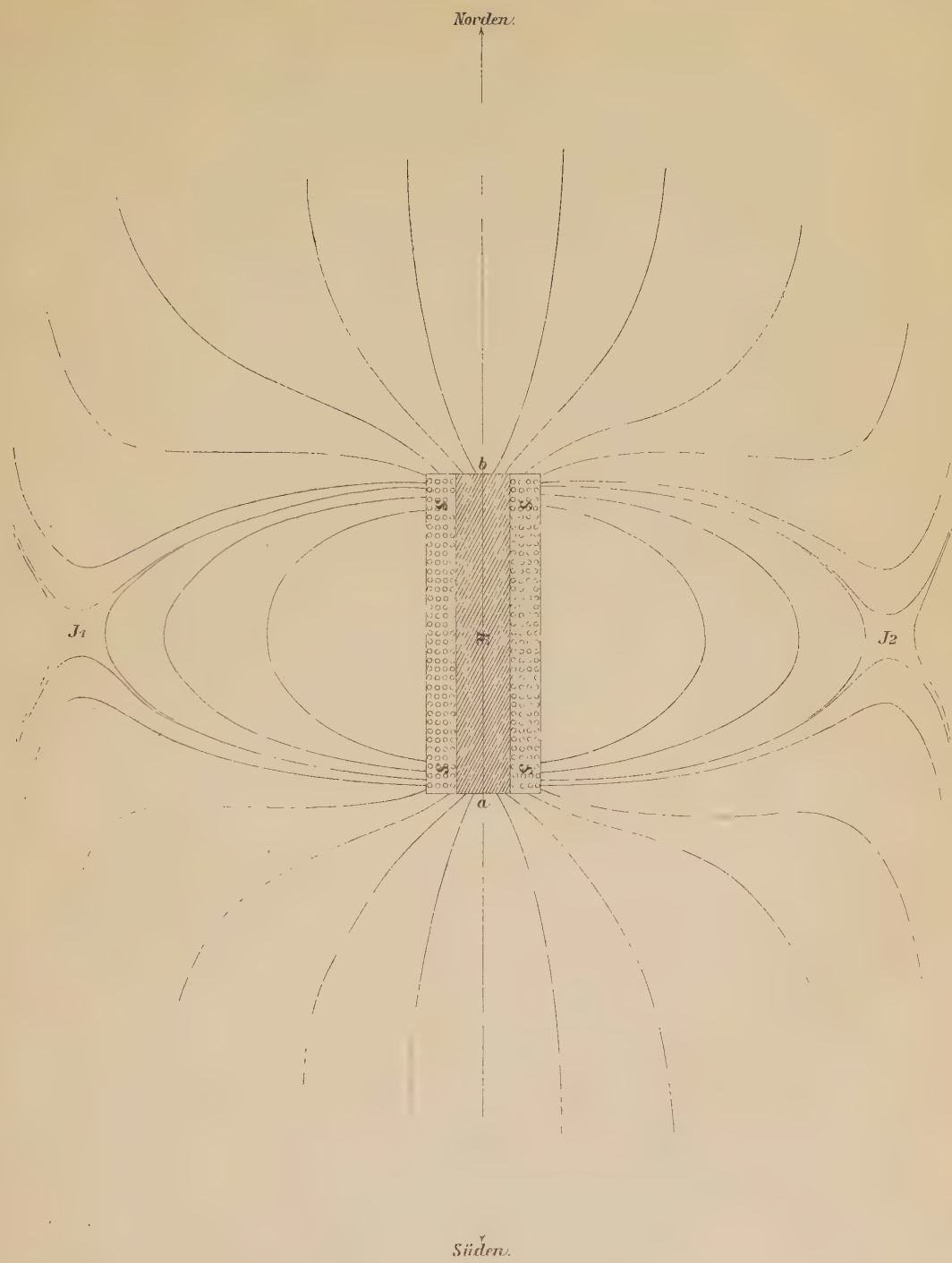














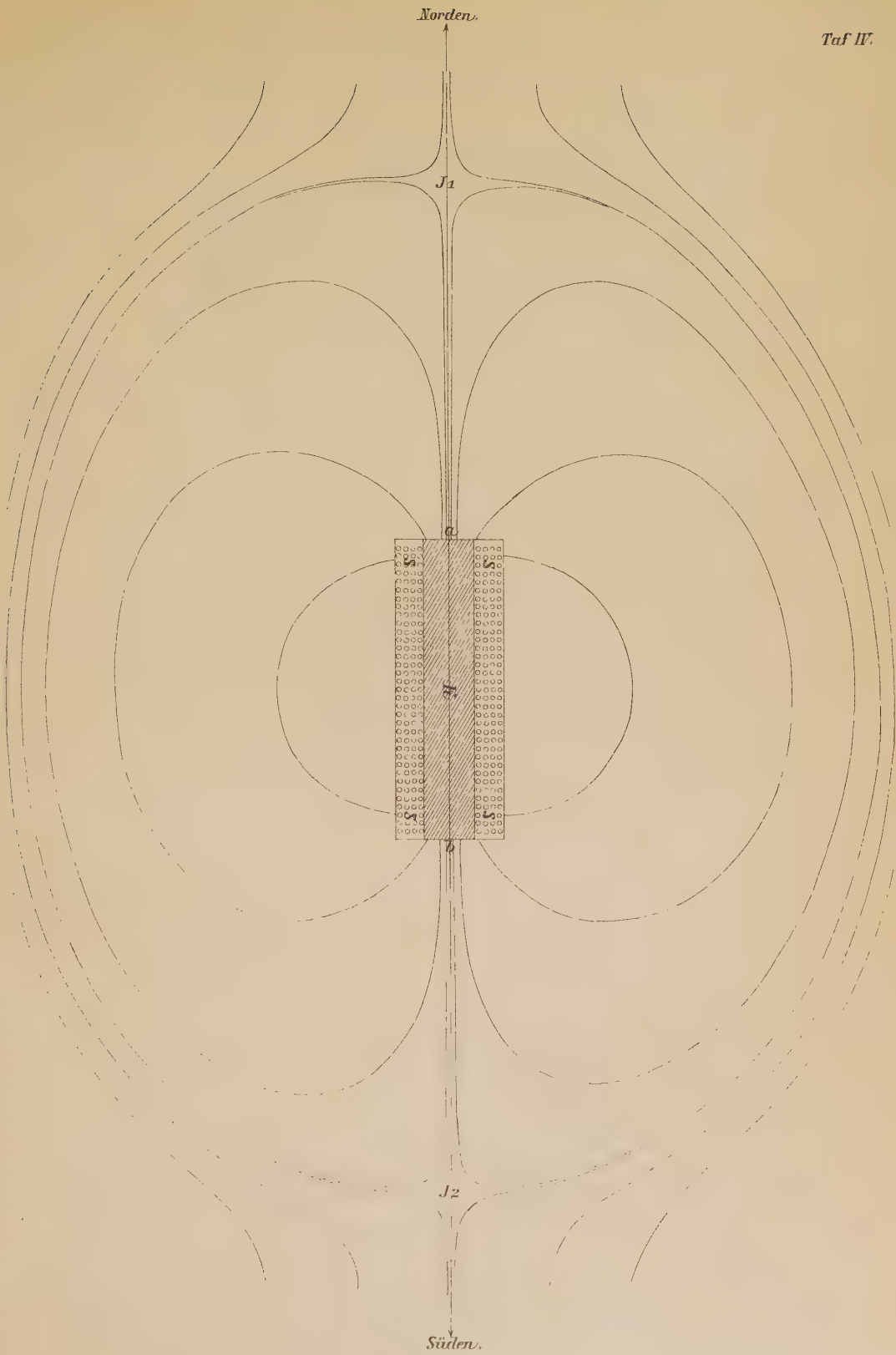
Norden.

Taf. IV.

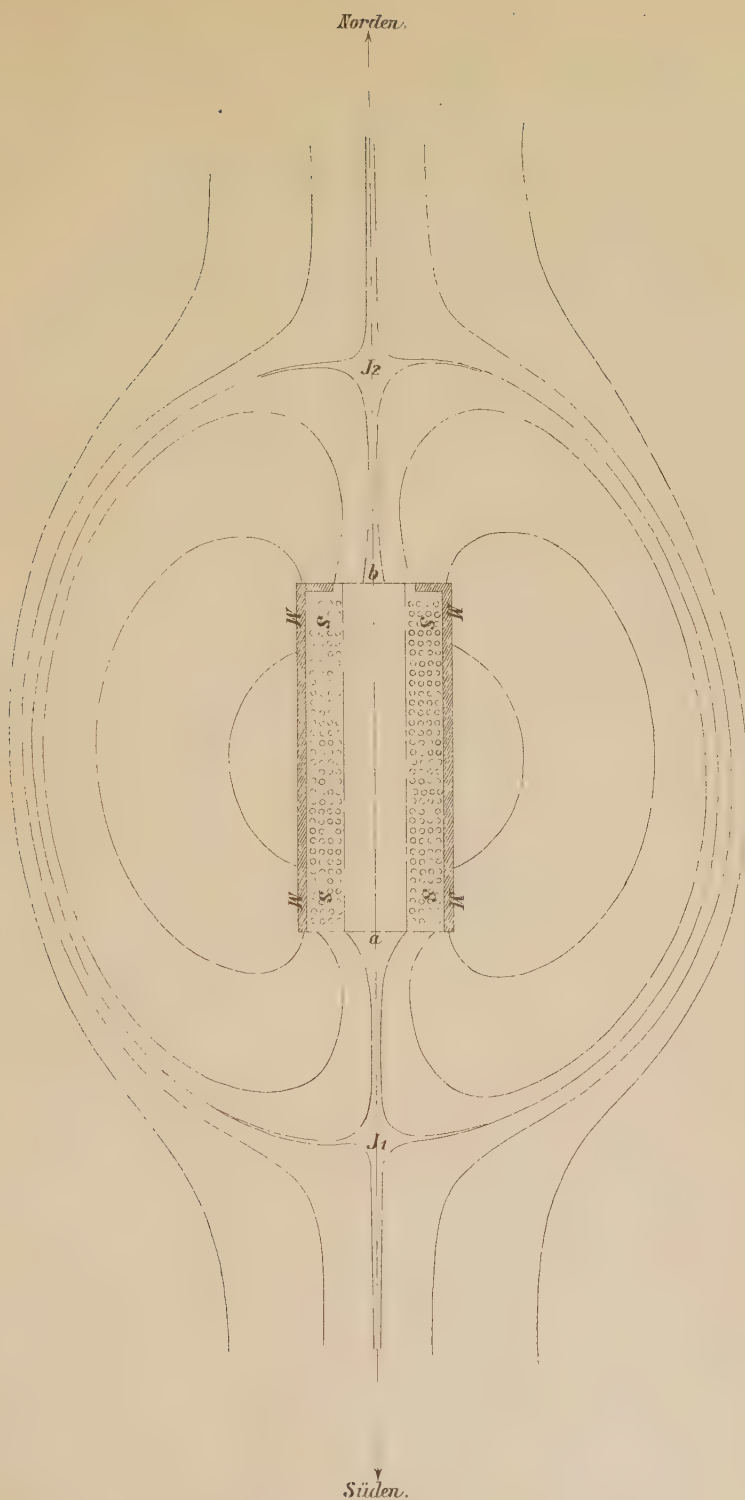
J_1

J_2

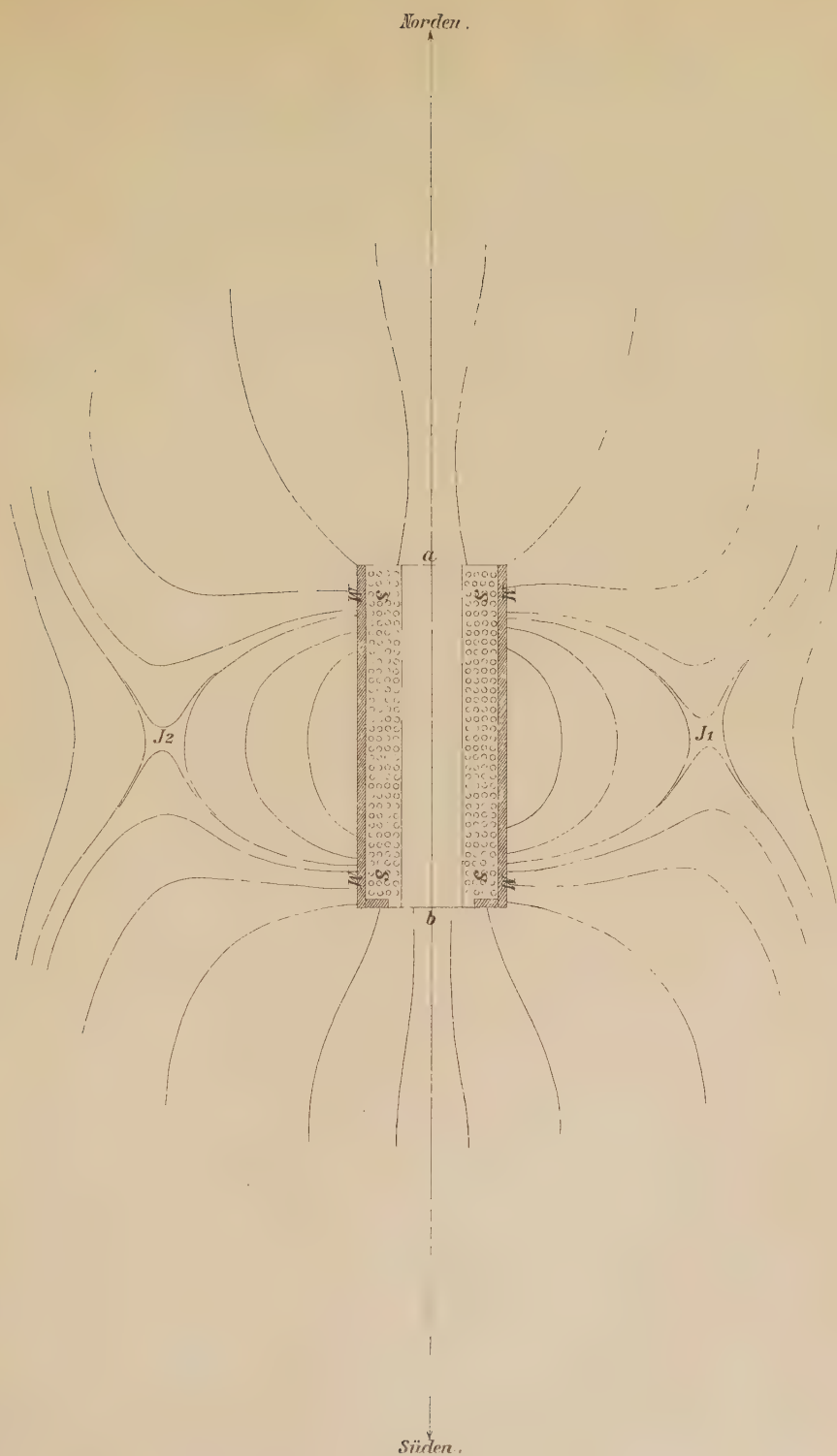
Süden.



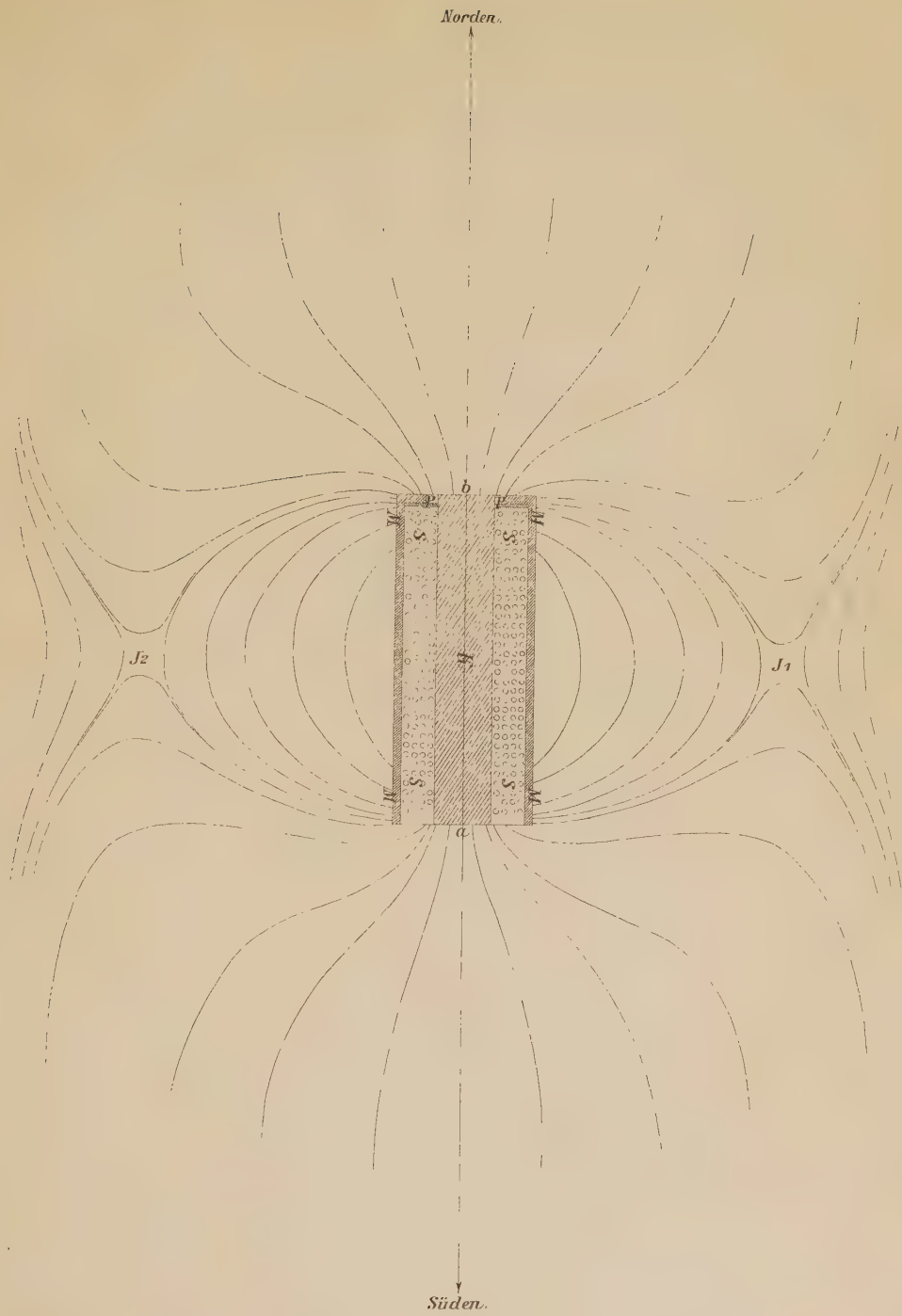




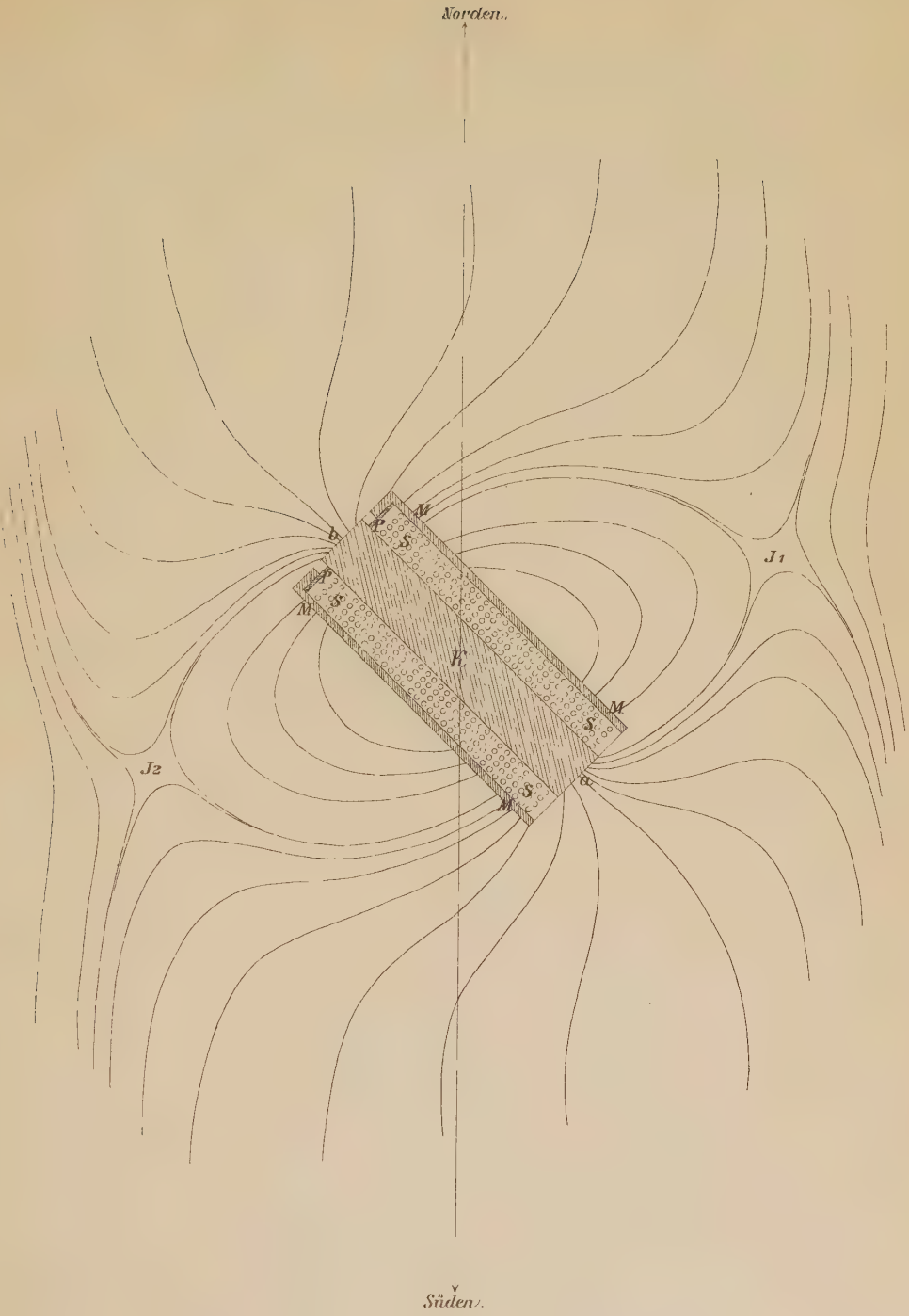




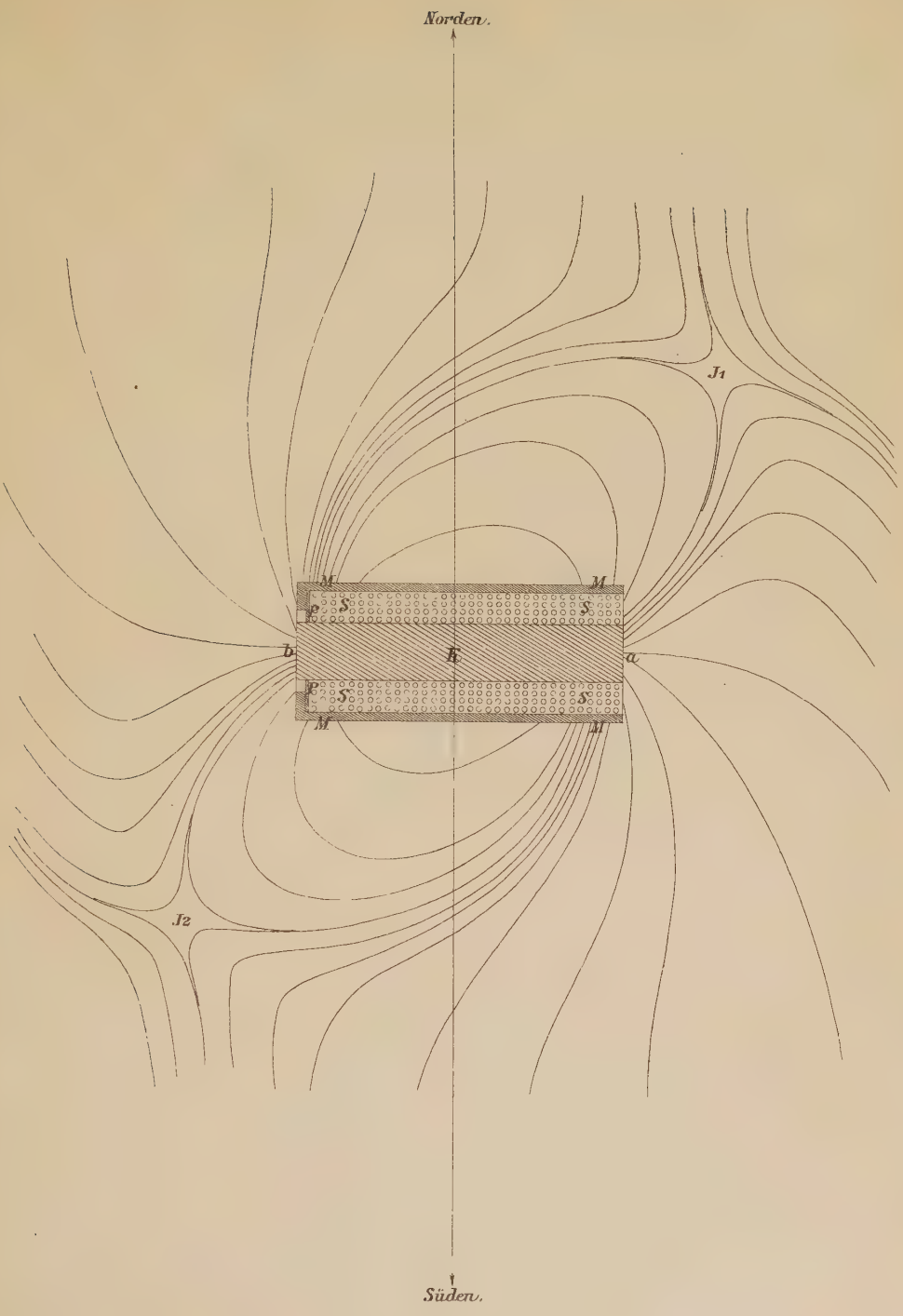




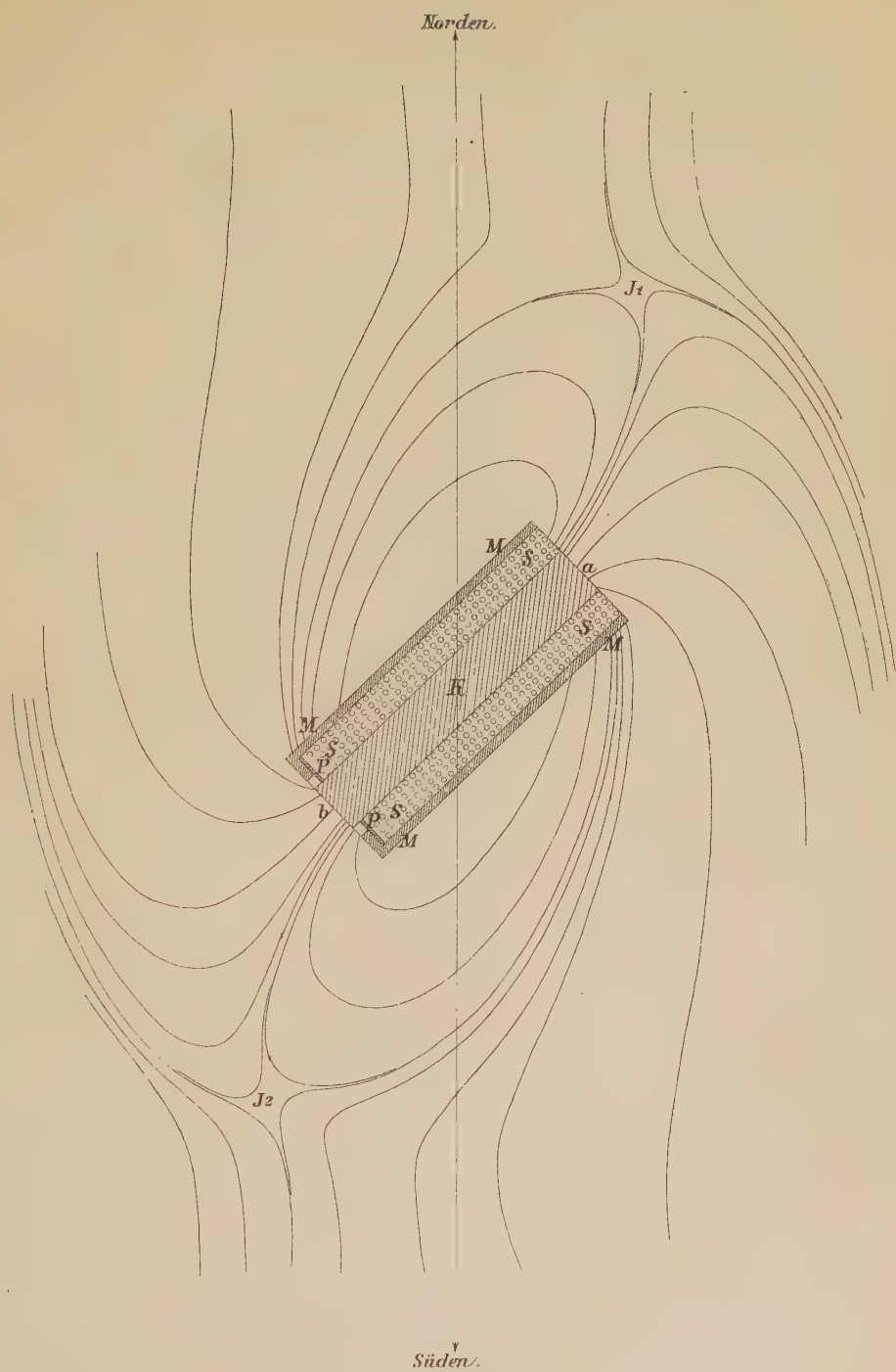




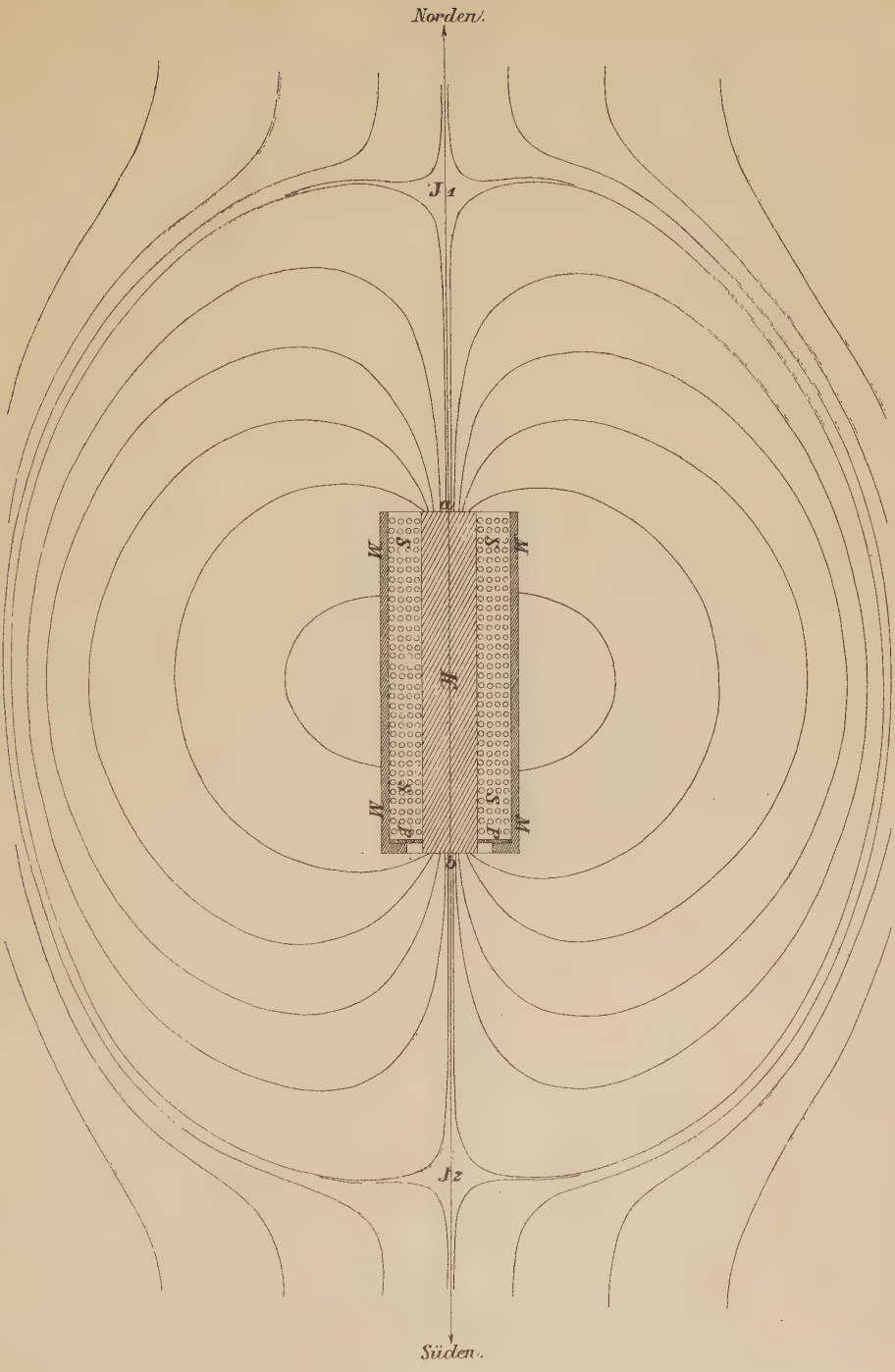




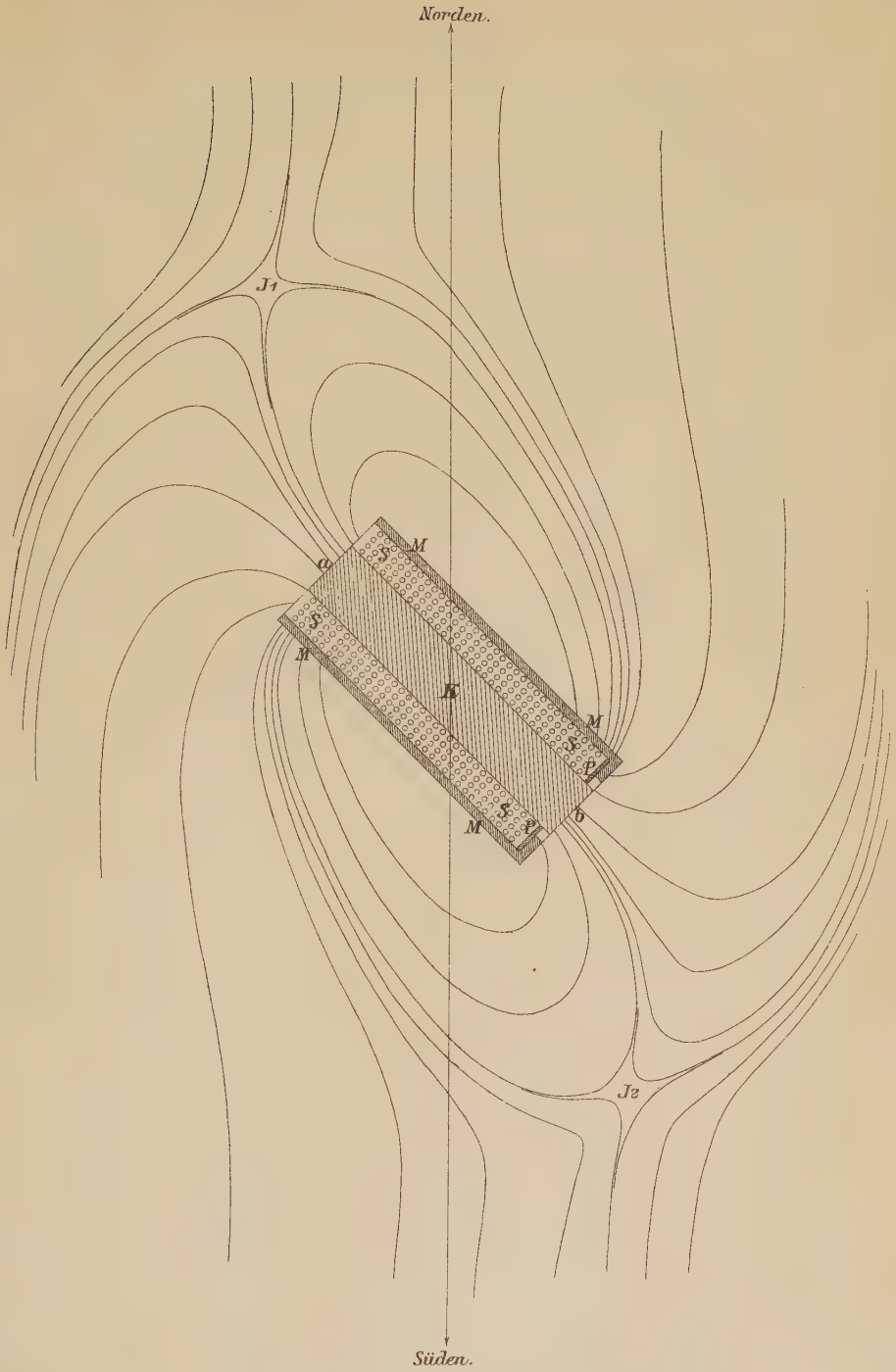














Norden.

Süden.

